



# **Slutet på Moores lag -vad kommer sedan?**

Christer Svensson  
Linköpings Universitet



## **Outline**

**Moore's lag**

**Vad kommer sedan?**

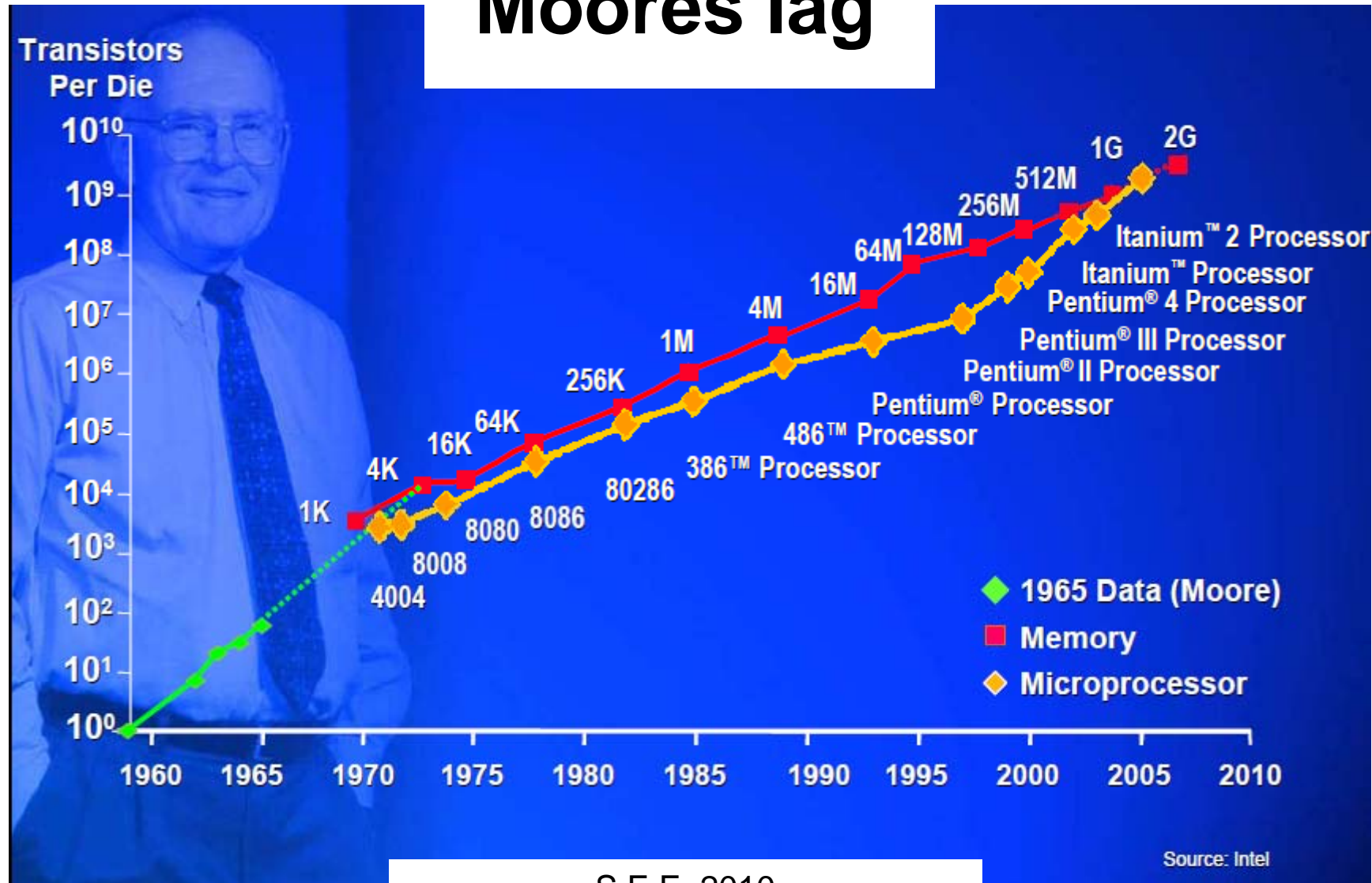
**Digital trends**

**Analog trends**

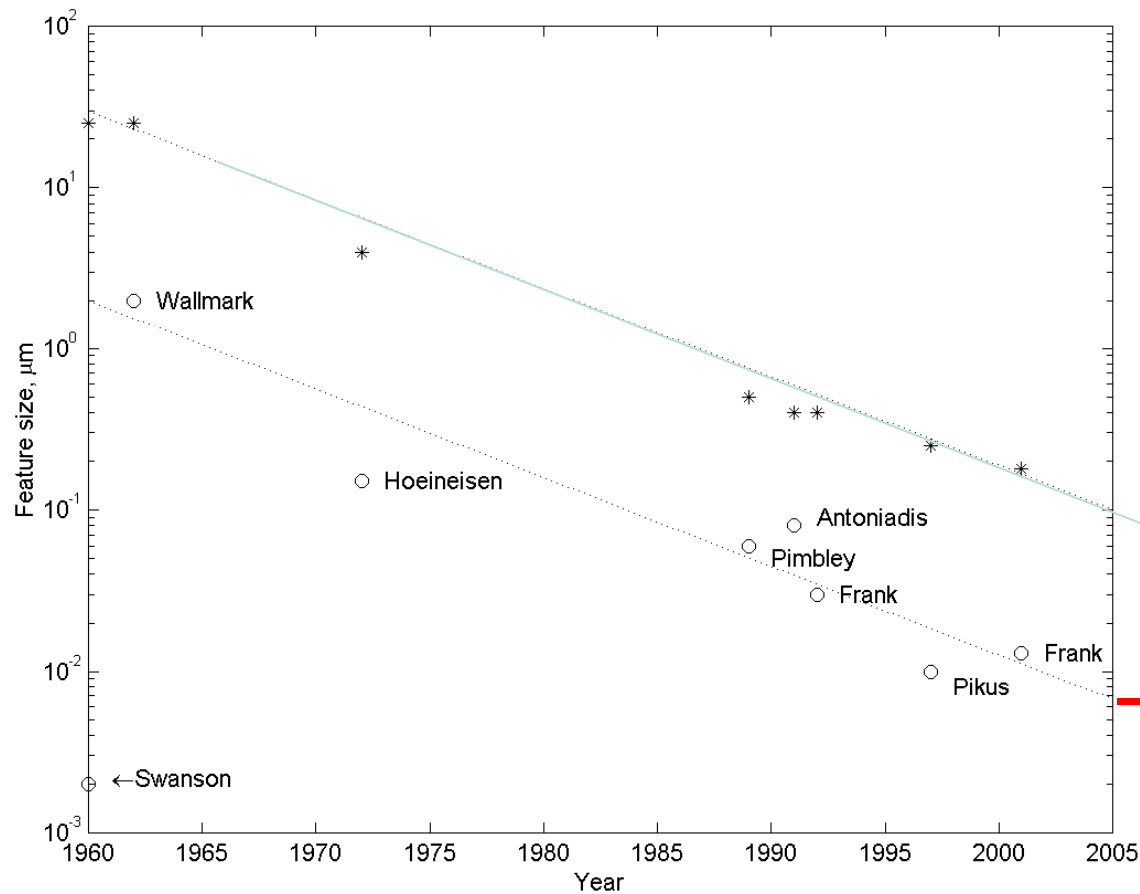
**Ultralåg effekt**

**Sammanfattning**

# Moore's lag



# Moore's lag



Hög risk att  
förutsäga slutet  
på Moores lag

\* 2010, 32nm

8nm floor (?)

# Moore's lag

## Hög risk att förutsäga slutet på Moore's lag

Jag tar dock risken

Frank (IBM) 2001: ~8nm (2030?)

Detta är 20 atomer på rad.

Många fenomen hindrar mindre geometrier.

Styreoxiden blir för tunn, tunnelingströmmar,  
motverkas av "high  $\kappa$  dielectric".

Drainfältet penetrerar till source,  
motverkas av dubbel gate eller FINFET-strukturer

Avståndet drain-source för kort – tunnelingströmmar.

# Moore's law

Bohr (Intel) 2009: Klassisk skalning upphörde  
~2005

Därefter strained Si, high  $\kappa$ , mm.

Sedan FINFET, mm.

Ger begränsad fortsättning.

Stor mängd nya problem:

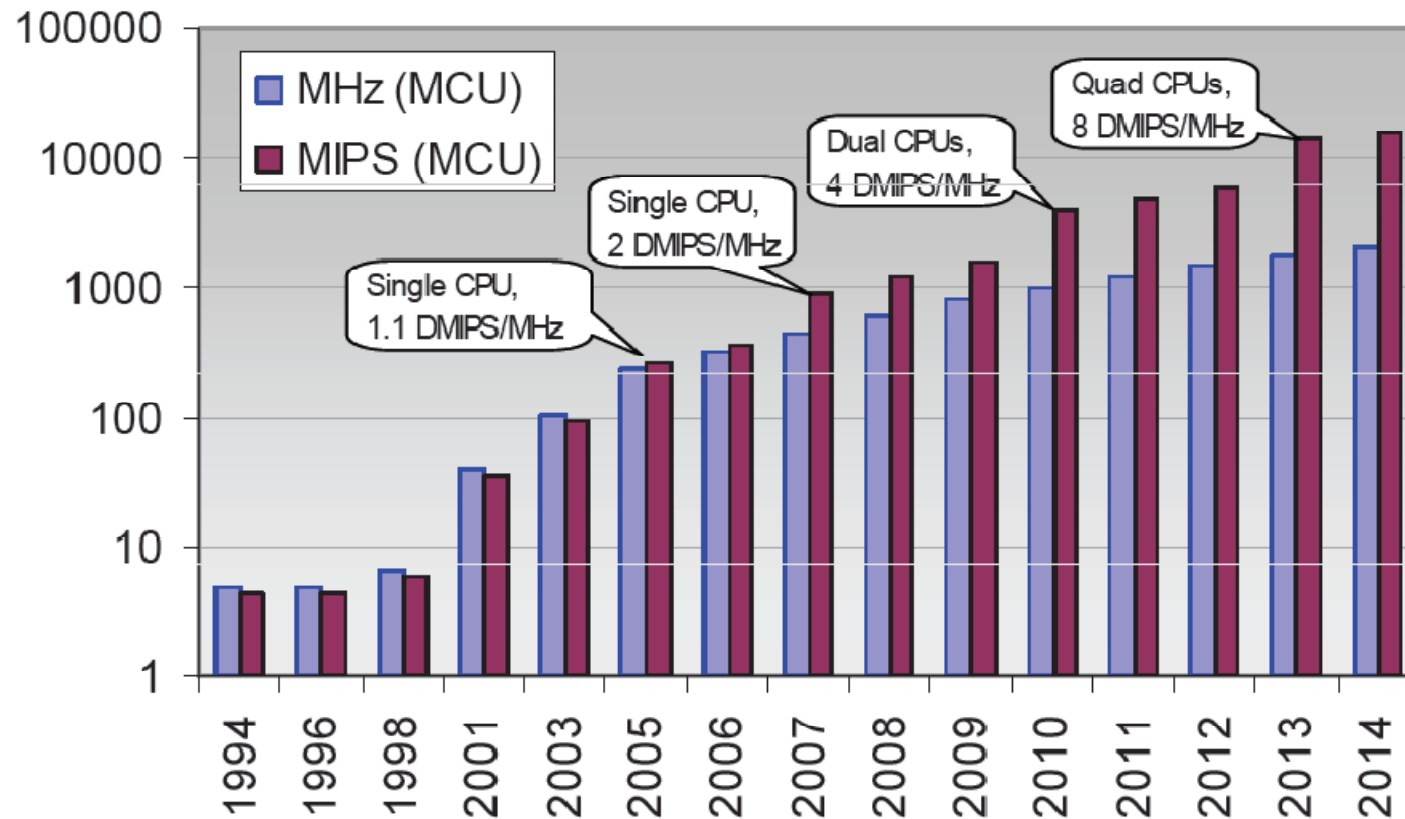
Läckströmmar

Hög effekttäthet

Stor parameterspridning försvårar konstruktion

Långsamt ökande effekter av kosmisk strålning

# Moore's lag



Delagi, TI  
ISSCC2010

Mikroprocessorer  
klockfrekvens  
stagnerar

## Vad händer sedan?

Moore's lag har gett oss ständigt ökande kapacitet till ständigt lägre effekt och pris.

En stagnation av Moore's lag ger stora möjligheter till innovationer i kretsar, system och metoder.

Vi kan förvänta oss framsteg i oförändrad takt med nya metoder och kompetenser.

Elektroniken tjänar allt fler marknader





# Vad händer sedan?

Låt mig diskutera trender idag, inom

Digitalt

Analogt

Ultralåg effekt

# Digitala trender

Högre beräkningskapacitet hos processorer

Multicore, 2, 4, 8, 16 ...

Applikationsspecifika arkitekturer

Acceleratorer (MMX mm.)

Massiv parallellism fortsatt mycket svårutnyttjat

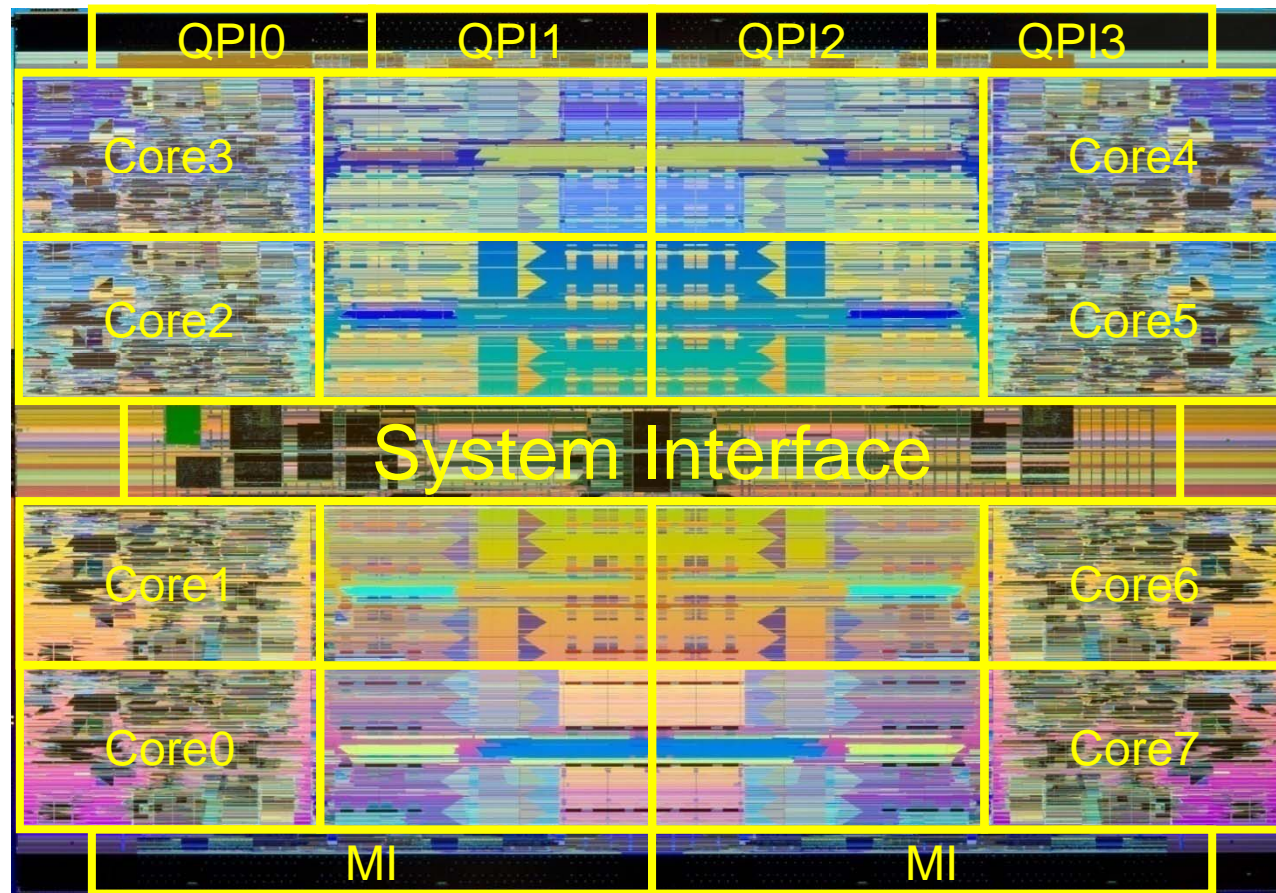
Lägre effektförbrukning

Exploatera effekt istället för prestanda

Applikationsspecifika arkitekturer

Effektiva program

# Digitala trender



**A 45nm 8-Core  
Enterprise Xeon®  
Processor**

**Stefan Rusu  
Intel  
ISSCC 2009**

**Notera mängden  
minne!**

**Minnesaccess  
flaskhals**

# Digitala trender

## Multicore för ökad kapacitet vid fix klockfrekvens

Kräver nya operativsystem /programmeringsmetoder

Olika program på olika kärnor

Ett program på flera kärnor kräver ny kod

Minnesaccess är flaskhals - försämras

# Digitala trender

## Applikationsspecifika arkitekturer

Grafikprocessorn stor framgång – gjord för grafik

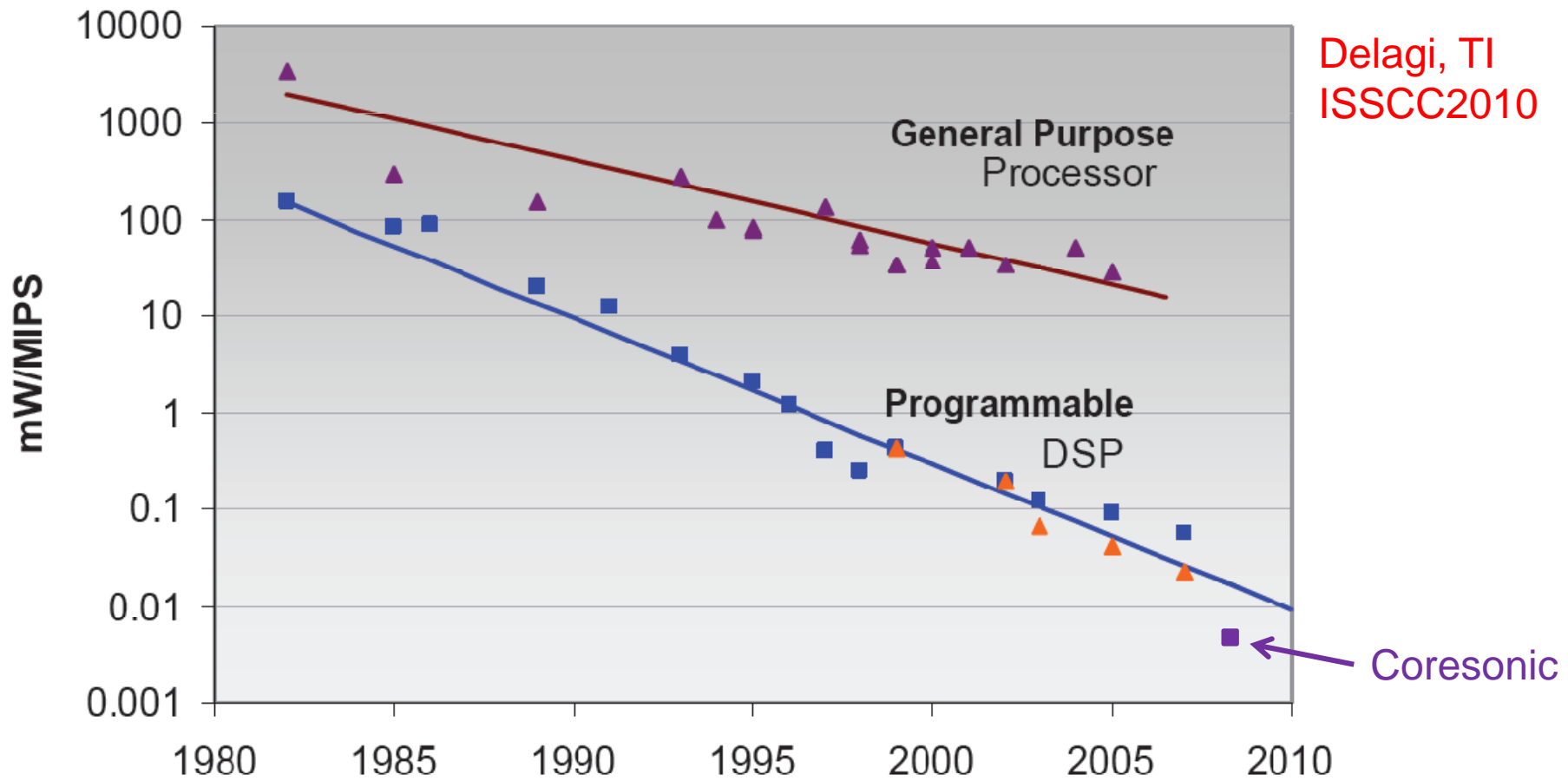
Vektor och matrisorienterad

Nya användningar för tunga matematiska uppgifter

Digitala signalprocessorer (DSP)

(Återkommer med fler exempel)

# Digitala trender



# Digitala trender

## Acceleratorer

Specialiserade processorer inom en mikroprocessor

Exempel MMX, liten SIMD-maskin inom en Pentium  
(Ett 64b ord behandlas som 4 16b ord på vilka man  
utför samma operation parallellt)

Multiplikatorer, flyttalsprocessorer

Grafikprocessorer

# Digitala trender

## Massiv parallellism

Gammal idé – fortfarande inte särskilt framgångsrik

Problem: Minnesaccess

Kollisioner då olika processorer accessar samma minne  
Problem att veta om minnesinformationen är aktuell

Exempel: Cell (IBM/Sony), PowerPC + stort antal små kärnor



# Digitala trender

## Lägre effektförbrukning

Under lång tid prioriterades prestanda

Metoder för låg effekt utvecklades på 90-talet

(Berkeley och Linköping)

Lägre matningsspänning

Parallella beräkningar

Lågt sving på I/O

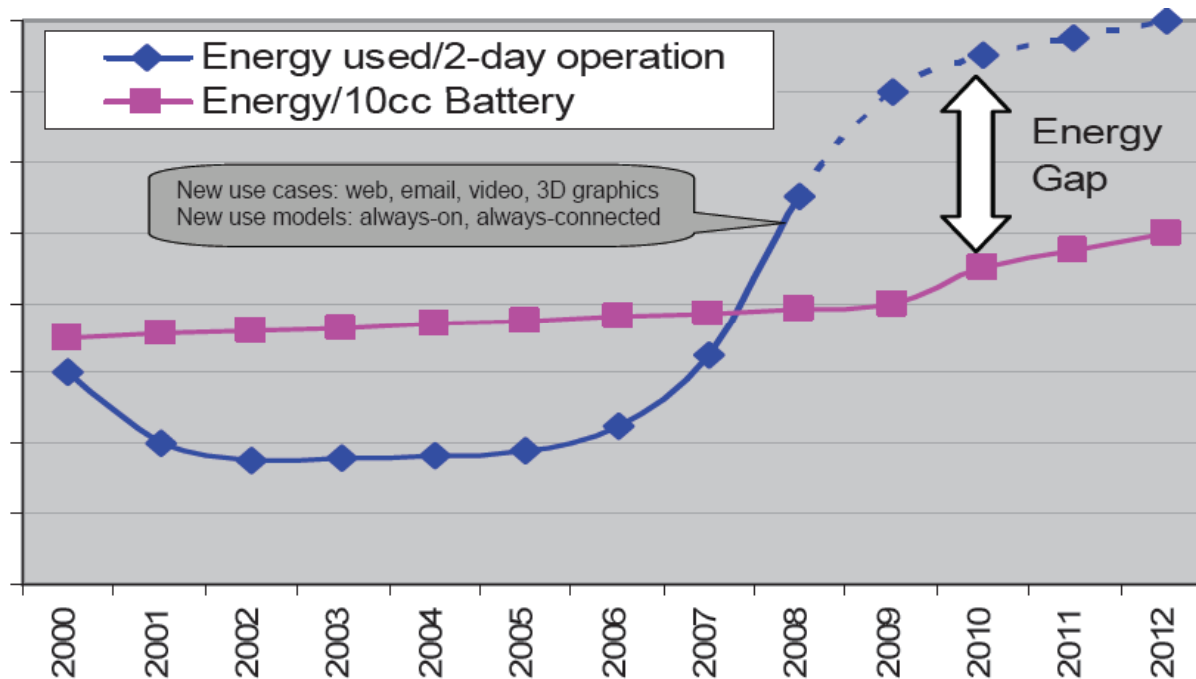
Minimera trafik mellan chip

Mindre minnen, begränsa minnesaccesserna

$$P = f_c \frac{V_{dd}^2}{2} \sum a_i C_i$$

# Digitala trender

Kraven kommer nu! Avancerade mobiler, mobila datorer ...



Delagi, TI  
ISSCC2010

Batterilivslängd  
nytt försäljnings-  
argument?

Men långsamt

# Digitala trender

## Lägre effektförbrukning

- exploatera effekt istället för prestanda

$$P = \alpha_a \frac{V_{dd}^2}{2} C_a f_c N$$



Minskar vid skalning    Kan öka vid skalning

Traditionellt: Öka prestanda ( $f_c$  och  $N$ ), samma effekt

Ny trend: Behåll prestanda, minska effekt via  $V_{dd}$  och  $C_a$

# Digitala trender

## Applikationsspecifika arkitekturer

*General purpose* - arkitekturen kommer inte längre

Applikationsspecifikt kan ge stora vinster

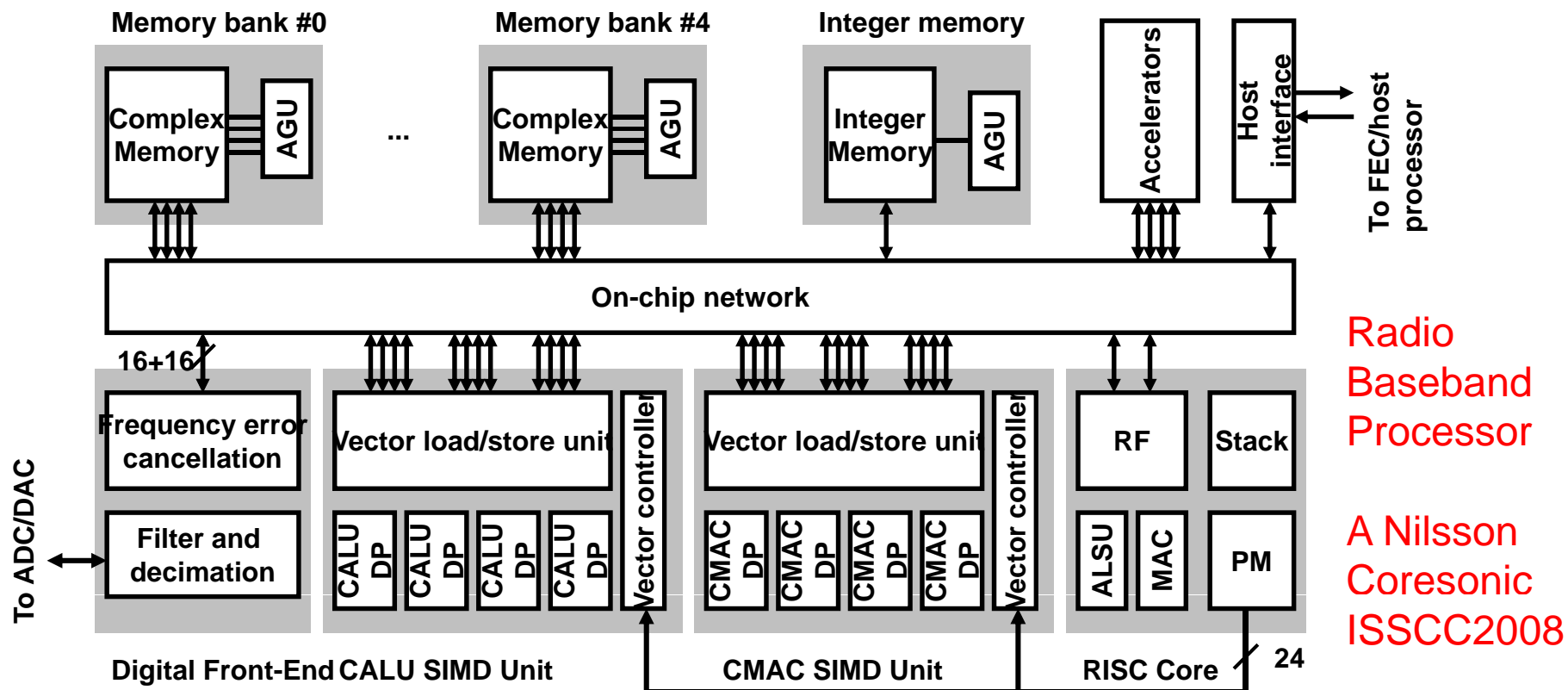
Exempel: Coresonics arkitektur för radio basband  
(Coresonic AB, Linköping)

Datatyp: komplexvärda vektorer

Liten kontrollenhet, effektiva instruktioner

Många parallella processer på parallella ALUer och minnen

# Digitala trenden



# Digitala trender

## Resurssnål programmering

Programmera för låg effektförbrukning

Hårdvarunära programmering – kräver hårdvarukunskap

Spara på minnesaccesser

mm.

# Analoga trender

Trådlös teknik mot högre datatakter och nya band

LTE mot 1Gb/s

Mikrovågslänkar mot 10Gb/s (60...120GHz)

Flexibel radio (mjukvaruradio, SDR)

Trådbunden teknik mot högre datatakter

Optolänkar 100Gb/s över en våglängd

Multipla 10Gb/s länkar på kretskort

Lägre effektförbrukning

# Analoga trender

## Moore – analogt?

Klar trend att använda digital CMOS även för analogt:

Bra:

Hög integrationsgrad – lågt pris

Små geometrier – höga gränshfrekvenser ( $f_T \sim 200\text{GHz}$ )

Dåligt:

Låga matningsspänningar ( $\sim 1\text{V}$ )

Mer parasiter, stor spridning



# Analoga trender

## Trådlös teknik mot högre dataakter och nya band

Mobil radio utvecklas vidare – LTE  
upp till 1Gb/s (multipla antenner)  
massor av band (698-2690 MHz)  
stora krav på teknologiutvecklingen

Mikrovågslänkar för backhaul  
dataakter upp till 10Gb/s  
nya band 60-120GHz  
(Pågående Vinnova-projekt, Chalmers, Ericsson, LiU,  
Bitsim mfl.)

# Analoga trender

## Trådlös teknik – exempel på ny teknologi

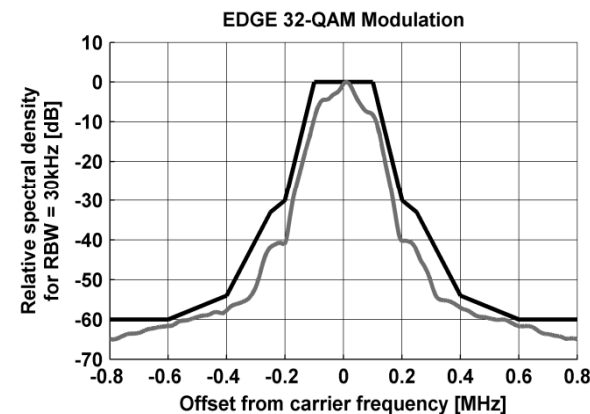
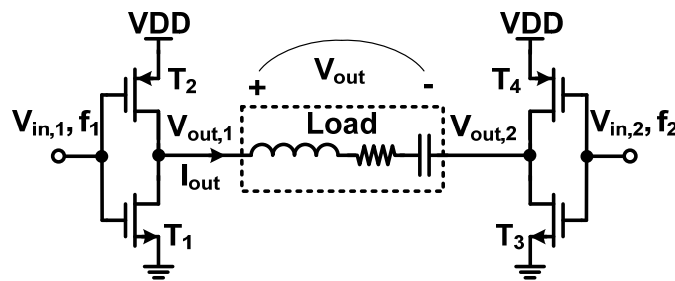
### Mjukvaruradio

samma hårdvara för alla band och modulationer

exempel på utmaning: multiband PA med hög verkningsgrad  
för komplex modulation

# Analoga trender

## Wide band Class D outphasing PA



Jonas Fritzin  
LiU 2010

Demo visar uppfylld EDGE 32-QAM spektrum utan fördistortion

$P_{\max} = 10.3 \text{ dBm}$ , PAE = 33% vid 2GHz. Bandbredd 2GHz (1...3GHz)

# Analoga trender

## Trådbunden teknik mot högre datatakt

10-20Gb/s per trådpar, kretskort och bakplan  
finns upp till 10Gb/s även på FPGA

100Gb/s Ethernet per våglängd i optiska nät  
kräver mer avancerad modulation  
exempel på utmaning: 28 eller 56GS/s ADC

Exempel: 2.4GS/s, 5b, 320mW ADC. Med interleaving kan man erhålla önskad datatakt (Timmy Sundström, LiU 2010)

# Analoga trender

## Lägre effektförbrukning

Ganska liten forskning på analog effektförbrukning  
(tills nu?)

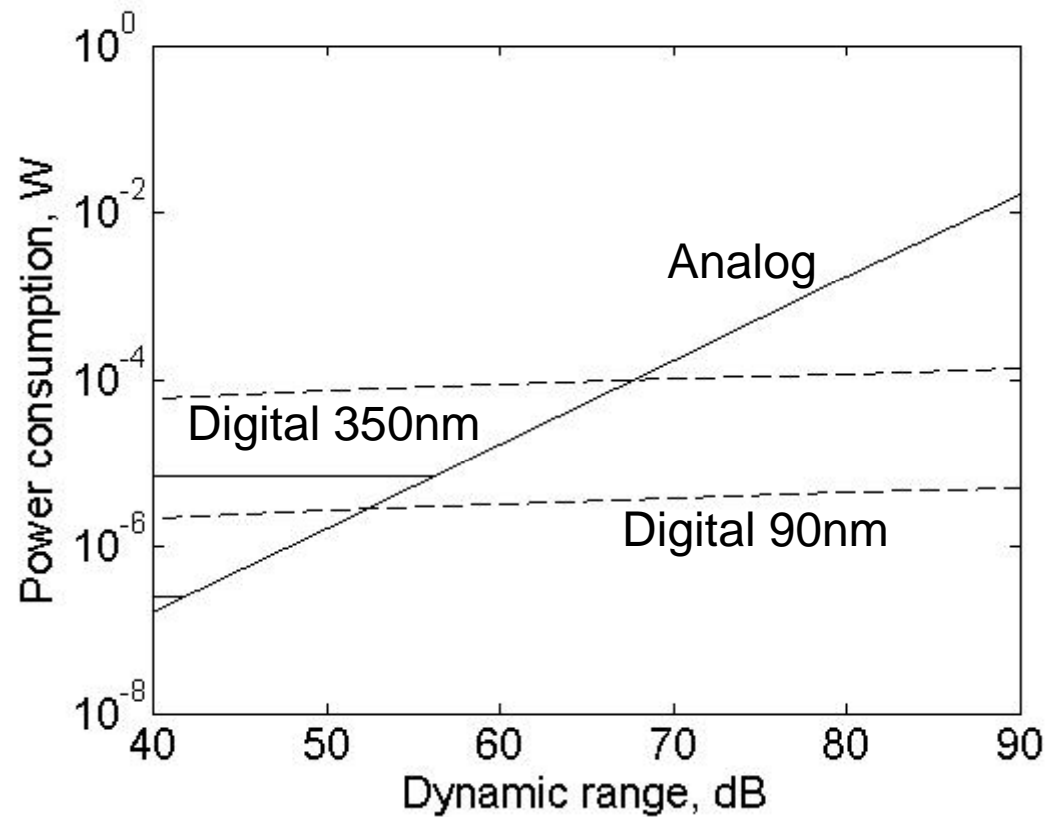
Exempel samplers:  $P = 16kTf_s D$

Samplingfrekvens

Dynamiskt område

Vanligaste "fel": för stora säkerhetsmarginaler

# Analoga trender



Jämförelse mellan  
analogt och digitalt.  
1-pols filter

# Ultralåg effekt

Ultralåg effektförbrukning möjliggör  
system med 10-20 års batterilivslängd  
system som klarar sin egen energiförsörjning  
(energy harvesting)

## Applikationer

Identifieringsetiketter (RFID)  
Distribuerade sensorsystem  
Inplanterade biosensorer



# Sammanfattning

**Moore's lag närmar sig successivt ett slut**

**Massor kvar att exploatera hos kiseltekniken**